

УДК 621.643:620.191.4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ БКІТ-2 ДЛЯ КОНТРОЛЮ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ ПІДЗЕМНИХ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ

© Яворський А.В., Витвицька Л.А. Кісіль І. С, 2004

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Проведено оцінку похибок розробленого пристрою БКІТ-2 для безконтактного вимірювання струму в стінках контрольованого підземного нафтогазопроводу. Показано, що сумарна похибка вимірювання струму не перевищує 5,2%. Описано розроблене метрологічне забезпечення, що дозволяє проводити калібрування пристрою БКІТ-2 а також бути використаним при його метрологічній атестації

Технічний стан підземних нафтогазопроводів в значній мірі залежить від стану їх ізоляційного покриття, тому його контроль є актуальною задачею, яка в певній мірі вирішується шляхом застосування пристрою БКІТ-2 [1]. Для промислового застосування даного пристрою контролю необхідно оцінити його похибки як засобу вимірювання і розробити необхідне метрологічне забезпечення. Оскільки оцінка стану ізоляційного покриття проводиться на базі безконтактного вимірювання струму в стінках підземного трубопроводу вздовж контрольованої ділянки [2], тому метрологічний аналіз для пристрою БКІТ-2 проводиться шляхом визначення сумарної похибки визначення струму.

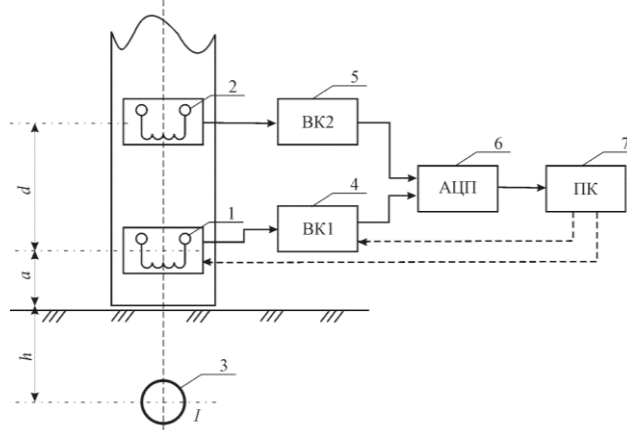
Процес вимірювання величини струму в стінках трубопроводу за допомогою пристрою БКІТ-2 наведений на рис.1. Згідно з [1, 3] глибина залягання трубопроводу і величина струму визначаються з наступних залежностей:

$$h = \frac{U_2 K_2 (d + a) - U_1 K_1 a}{U_{1(457)} K_{1(457)} - U_2 K_2}, \quad (1)$$

$$I = U_{1(87)} K_{1(87)} \cdot 2\pi \left(\frac{U_2 K_2 (d + a) - U_{1(457)} K_{1(457)} \cdot a}{U_{1(457)} K_{1(457)} - U_2 K_2} + a \right), \quad (2)$$

де h - глибина, визначена на пошуковій частоті 457 Гц; I - струм визначений на вимірювальній частоті 87 Гц; $K_{1(457)}$ і $K_{1(87)}$ - коефіцієнти передачі 1-го вимірювального каналу на відповідних частотах; K_2 - коефіцієнт передачі 2-го вимірювального каналу; $U_{1(87)}$ і $U_{1(457)}$ - напруги на виході нижньої магнітної антени 1 (рис.1) на відповідних частотах; U_2 - напруга на виході верхньої магнітної антени 2; d - відстань між осями магнітних антен 1 і 2; a -

відстань від осі магнітної антени 1 до торця корпусу пристрою, яка співпадає з рівнем землі.



1 - нижня магнітна антена; 2 - верхня магнітна антена; 3 - трубопровід; 4 - 1-й вимірювальний канал; 5 - 2-й вимірювальний канал; 6 - аналогоцифровий перетворювач; 7 - пристрій керування

Рис. 1. Схема безконтактного вимірювання струму в стінках підземного трубопроводу за допомогою пристрою БКІТ-2

Розрахунок абсолютної похибки посереднього вимірювання струму доцільно здійснювати диференціальним методом через часткові похідні по аргументах у формулі (2) [4]:

$$\begin{aligned} \Delta I = & \frac{\partial I}{\partial U_{1(87)}} \cdot \Delta U_{1(87)} + \frac{\partial I}{\partial K_{1(87)}} \cdot \Delta K_{1(87)} + \\ & + \frac{\partial I}{\partial U_{1(457)}} \cdot \Delta U_{1(457)} + \frac{\partial I}{\partial U_2} \cdot \Delta U_2 + \\ & + \frac{\partial I}{\partial K_{1(457)}} \cdot \Delta K_{1(457)} + \frac{\partial I}{\partial K_2} \cdot \Delta K_2 + \frac{\partial I}{\partial d} \cdot \Delta d + \frac{\partial I}{\partial a} \cdot \Delta a \end{aligned} \quad (3)$$

Знайшовши часткові похідні для виразу (3) отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta I = & 2\pi K_{1(87)} \left(\frac{U_2 K_2 (d+a) - U_1 K_1 \cdot a}{U_{1(457)} K_1 - U_2 K_2} + a \right) \cdot \Delta U_{1(87)} + 2\pi U_{1(87)} \left(\frac{U_2 K_2 (d+a) - U_1 K_1 \cdot a}{U_{1(457)} K_1 - U_2 K_2} + a \right) \cdot \Delta K_{1(87)} + \\ & + 2\pi U_{1(87)} \cdot K_{1(87)} \cdot \left(\frac{K_{1(457)} a \cdot (U_{1(457)} K_1 - U_2 K_2) - K_1 (U_2 K_2 (d+a) - U_{1(457)} K_{1(457)} \cdot a)}{(U_{1(457)} K_1 - U_2 K_2)^2} \right) \cdot \Delta U_{1(457)} + \\ & + 2\pi U_{1(87)} \cdot K_{1(87)} \cdot \left(\frac{K_2 (d+a) \cdot (U_{1(457)} K_1 - U_2 K_2) + K_2 (U_2 K_2 (d+a) - U_{1(457)} K_{1(457)} \cdot a)}{(U_{1(457)} K_1 - U_2 K_2)^2} \right) \cdot \Delta U_2 + \\ & + 2\pi U_{1(87)} \cdot K_{1(87)} \cdot \left(\frac{-U_{1(457)} a \cdot (U_{1(457)} K_{1(457)} - U_2 K_2) - U_{1(457)} (U_2 K_2 (d+a) - U_{1(457)} K_{1(457)} \cdot a)}{(U_{1(457)} K_1 - U_2 K_2)^2} \right) \cdot \Delta K_{1(457)} + \\ & + 2\pi U_{1(87)} \cdot K_{1(87)} \cdot \left(\frac{U_2 (d+a) \cdot (U_{1(457)} K_{1(457)} - U_2 K_2) + U_2 (U_2 K_2 (d+a) - U_{1(457)} K_{1(457)} \cdot a)}{(U_{1(457)} K_{1(457)} - U_2 K_2)^2} \right) \cdot \Delta K_2 + \\ & + 2\pi U_{1(87)} \cdot K_{1(87)} \cdot \left(\frac{U_2 K_2}{U_{1(457)} K_{1(457)} - U_2 K_2} \right) \cdot \Delta d + 2\pi U_{1(87)} \cdot K_{1(87)} \cdot \left(\frac{U_2 K_2 d}{U_{1(457)} K_{1(457)} - U_2 K_2} + 1 \right) \cdot \Delta a . \end{aligned} \quad (4)$$

Для розрахунку похибки вимірювання струму були проаналізовані похибки окремих складових залежності (4), визначені впливи різних зов-

нішніх факторів і розроблена схема накопичення абсолютної сумарної похибки вимірювання струму, яка представлена на рис. 2.

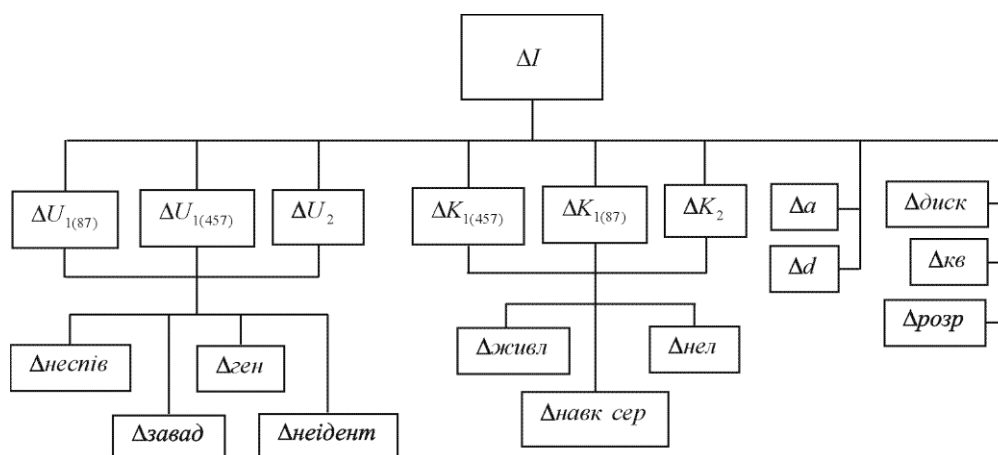


Рис.2. Схема накопичення сумарної абсолютної похибки пристрою БКІТ-2 для безконтактного вимірювання струму в стінках підземного трубопроводу

На рис. 2 представлені абсолютні похибки параметрів, які входять у залежність (4), а також впливи факторів на появу цих похибок. Були розглянуті і проаналізовані впливи різних факторів, що дало можливість поділити похибки на чотири основні групи за критеріями причин їх появи.

Так, похибки вимірювання напруг U_1 на двох визначених частотах і U_2 на частоті 457 Гц викликані неспіввісністю осі трубопроводу та осей магнітних антен $\Delta_{\text{неспів}}$ (рис.2), впливом завад викликаних зовнішніми магнітними полями $\Delta_{\text{завад}}$, неідентичністю форми магнітних антен $\Delta_{\text{неідент}}$, нестабільністю частоти сигнал-генератора $\Delta_{\text{ген}}$, який вхо-

дить в склад пристрою БКІТ-2, як окрема одиниця [1].

Другу групу похибок складають похибки коефіцієнтів передач $\Delta K_{1(457)}$, $\Delta K_{1(87)}$, ΔK_2 , які викликані нестабільністю напруги живлення $\Delta_{\text{живл}}$, нестабільністю параметрів навколишнього середовища $\Delta_{\text{навк сер}}$ та нелінійністю характеристик складових вимірювальних каналів $\Delta_{\text{нел}}$.

Третю групу складають похибки невідповідності розмірів Δd , причиною якої є невідповідність реальної відстані між осями магнітних антен, та похибка Δa , яка викликана невідповідністю реальної

відстані між віссю магнітної антени 1 (рис.1) і нижньою гранню корпусу пристрою БКІТ-2.

У четверту групу входять похибки мікроконтролера, в який входить АЦП 6 і пристрій керування 7 (рис.1). Дані похибки пов'язані із дискретизацією $\Delta_{\text{диск}}$ і квантуванням сигналів $\Delta_{\text{кв}}$ та математичними операціями при розрахунку значення струму за формулою (2).

Аналіз вищевказаних похибок проводився як теоретично, так і експериментально. Значення похибки $\Delta_{\text{неспів}}$ було розраховано на підставі даних викладених у [5], згідно з якими при візуальній орієнтації пристрою, з конструктивним розміщенням магнітних антен як на рис.1, відносно осі трубопроводу, кут відхилення між осями магнітних антен і віссю трубопроводу не перевищує 5° , що викликає похибку визначення глибини залягання менше 0,5 %. Використовуючи для просторової орієнтації пристрою БКІТ-2 над трубопроводом вертикальну магнітну антену [1], дане відхилення можна зменшити до 2° , що складе зміну вихідної напруги U_1 або U_2 не більше, ніж $\pm 1,25$ мкВ.

Для зменшення похибки, викликаной дією зовнішніх магнітних полів $\Delta_{\text{завад}}$, в пристрої БКІТ-2 застосовується активна система подавлення завад, яка описана в [3, 6], що дає можливість не враховувати дану складову.

На практиці найбільшу складність представляє забезпечення ідентичності конструктивних розмірів і форм магнітних антен, оскільки вони виготовляються вручну. Форма та розміри магнітної антени, яка представляє собою котушку індуктивності з повітряним осердям, характеризуються її індуктивністю, яка є інтегральним параметром і за якою можна оцінити ідентичність магнітних антен. Для дослідного взірця пристрою БКІТ-2 експериментально визначено індуктивність магнітних антен 1 і 2 (рис.1), що складають 117 мГн і 115,3 мГн відповідно. Різниця індуктивностей, яка приведена до максимального значення, складає 1,4%, що викликає зміну напруги на виходах магнітних антен в розмірі 7 мкВ.

Експериментальні дослідження застосовуваного в пристрої сигнал-генератора, які полягали у визначенні зміни його робочих частот при неперервній роботі протягом 3-х годин показали, що незалежно від генерованої частоти похибка задання частоти склала ± 1 Гц, що для випадку задання 87 Гц склало 2,3%, а у випадку задання частоти 457 Гц – 0,43%. В свою чергу це привело до зміни вихідної напруги на частоті 87 Гц на виході магнітної антени $\pm 11,5$ мкВ, а на частоті 457 Гц – $\pm 2,15$ мкВ.

Таким чином, абсолютні сумарні похибки напруг на виходах 1-ї (на частоті 457 і 87 Гц) і 2-ї (на частоті 457 Гц) магнітних антен, які визначаються

шляхом геометричного сумування складають $\Delta U_{1(87)} = \pm 13,5$ мкВ; $\Delta U_{1(457)} = \pm 7,4$ мкВ; $\Delta U_2 = \pm 7,4$ мкВ.

Похибки коефіцієнтів передач вимірювальних каналів визначались на основі їх складових, які були проаналізовані експериментально, а також за відомими характеристиками використовуваних у вимірювальних каналах елементів.

Напруга живлення пристрою БКІТ-2 формується від акумулятора, який розряджається в процесі роботи. Експериментально визначалась похибка коефіцієнта підсилення, яка як на частоті 87 Гц, так і на частоті 457 Гц склала $\Delta_{\text{живл}} = \pm 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

З основних параметрів, якими характеризується навколишнє середовище, найбільший вплив на нестабільність коефіцієнта передачі має температура. Оскільки пристрій БКІТ-2 використовується в польових умовах, то діапазон зміни робочої температури в літній період змінюється від $+10^\circ\text{C}$ до $+35^\circ\text{C}$. Для експериментальних досліджень впливу даного параметру було використано кліматичну камеру, в якій розміщувався пристрій БКІТ-2. При граничних значеннях температури максимальне абсолютне відхилення коефіцієнта підсилення від номінального значення $K_n = 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ склало $\Delta_{\text{накл сер}} = \pm 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Сумарну похибку, яка викликана нелінійністю характеристик блоків вимірювального каналу, було розраховано на основі довідникових даних про характеристики стандартних елементів, які використовувалися у даних блоках. Розрахунок здійснювався при умові максимального відхилення від номінального значення коефіцієнта підсилення кожного блоку. Оскільки вимірювальний канал представляє собою послідовне з'єднання попереднього та керованого підсилювачів, смугового фільтра і вимірювального випростувача, то сумарну абсолютну похибку було розраховано структурним методом [3]. При цьому максимальна похибка склала $\Delta_{\text{нел}} = \pm 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для 87 Гц і $\Delta_{\text{нел}} = \pm 350 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для частоти сигналу 457 Гц. Отже похибки коефіцієнтів підсилення вимірювальних каналів на частотах 457 Гц і 87 Гц, які розраховані шляхом геометричного сумування, відповідно склали: $\Delta K_{1(457)} = \pm 430 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\Delta K_{1(87)} = \pm 364 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\Delta K_2 = \pm 364 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

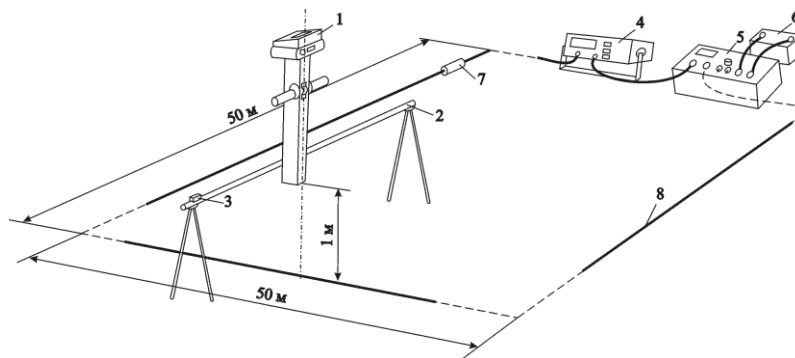
Теоретично задана відстань d між осями магнітних антен (рис.1) складає 0,5 м, відстань від осі нижньої антени до торця корпусу пристрою БКІТ-2 $a = 0,045$ м. Конструктивна похибка, яка зумовлена неточністю вимірювання відстані і неточністю виготовлення, складає відповідно $\Delta d = \pm 0,005$ м і $\Delta a = \pm 0,005$ м.

Дослідження четвертої групи похибок проводились на основі паспортних даних використовуваного мікроконтролера PIC16F877A [7]. При цьому було встановлено, що абсолютні похибки дискретизації та квантування не перевищують ± 1 -го знакового біту, що складає для 10-ти розрядного АЦП мікроконтролера при максимальній напрузі вхідного сигналу $\pm 0,0048$ В. При максимальному значенні сигналу на виході вимірювального каналу 5В дана похибка становить 0,01%. Похибка розрахунків

Дрозр є незначною (меншою $10^{-32}\%$), тому її можна не враховувати при визначенні сумарної похибки.

Розрахована відносна сумарна похибка визначення струму на основі сумарної абсолютної похибки і максимального значення вимірюваної величини струму становить 5,2%.

Для пристрою БКІТ-2 розроблено метрологічне забезпечення у вигляді установки, яка схематично представлена на рис. 3.



1-приймач пристрою БКІТ-2; 2-стояк; 3- індикатор горизонтального положення; 4-цифровий амперметр; 5-генератор пристрою БКІТ-2; 6-батарея акумуляторна; 7- навантаження; 8- провід

Рис. 3. Схема калібрування і повірки пристрою БКІТ-2

Установка представляє собою струмопровідний контур 8, який розташований по периметру квадрату з стороною 50 м, що дає можливість звести до мінімуму вплив प्रतिфазних завад на приймач пристрою [7]. Контур розміщений на неметалічній поверхні. Приймач пристрою БКІТ-2 розташований на стояку 2, горизонтальне положення якого контролюється індикатором рівня 3. Приймач 1 встановлений на однаковій віддалі від провідника 8, який моделює трубопровід, що припустимо на частоті робочого сигналу до 1000 Гц [5, 8]. Струм у колі створюється сигналом-генератором 5, що живиться від батареї 6 і контролюється за допомогою вірцевого цифрового амперметра 4. Обмежується струм навантаженням 7. Дана схема дає можливість проводити калібрування пристрою БКІТ-2, а також бути використаною при його метрологічній атестації повірці.

1. Яворський А.В. Особливості контролю ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів за допомогою пристрою БКІТ-2 // Методи і прилади контролю якості. - 2003. - №11 – С. 47-50. 2. Яворський А.В. Методика проведення контролю стану

ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів за допомогою системи бксіт // Методи і прилади контролю якості. - 2001. - №7 – С. 25-28. 3. Деклараційний патент UA 54031 А Україна, МПК 7 G01R31/12. Пристрій дистанційного контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів / Кісіль І.С., Ващишак С.П., Яворський А.В. (Україна). Опубл. 17.02.2003, Бюл. №2. 4. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань. - Івано-Франківськ: Факел, 2002. - 400 с. 5. Гордиенко В.И., Убогий В.П., Ярошевский Е.В. Электромагнитное обнаружение инженерных коммуникаций и локальных аномалий. - Киев: Наук.думка, 1981. 6. Яворський А.В., Кісіль І.С. контроль ізоляційного покриття підземних трубопроводів в умовах значних промислових електромагнітних завад // Методи і прилади контролю якості. - 2003. - №10 – С. 15-19. 7. www.microchip.ru 8. Дослідження магнітного поля паралельних трубопроводів, збуджених струмами низької частоти / Джала Р.М., Мізюк Л.А., Максименко О.П., Сенюк О.І. // Методи і прилади контролю якості. - 1999. - №4 – С. 3-6.